

**И.К. Прилуцкий**, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО, Институт холода и биотехнологий, ул. Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, РФ, 191002

e-mail: 55920852@mail.ru

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕКУЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ В ЭЛЕМЕНТАХ СТУПЕНЕЙ МАШИН ОБЪЁМНОГО ДЕЙСТВИЯ

*Эффективность машин объёмного действия (компрессоров и детандеров) зависит от характера осуществляемых в них процессов и особенно процессов теплообмена газа со стенками рабочей камеры и клапанами. При создании расчётно-экспериментального метода определения локального коэффициента теплоотдачи от газа к стенке цилиндра приняты допущения о квазистационарности процессов теплообмена и одномерном направлении теплового потока. Расчётная модель процессов создана в результате сочетания аналитического подхода с обоснованным выбором обобщенной критериальной зависимости. Использование модели позволило изучить влияние конструктивных (диаметр цилиндра, ход поршня) и режимных (степень повышения давления в ступени компрессора, частота вращения вала) показателей на величину локального коэффициента теплоотдачи при изменении угла поворота вала. Для упрощения модели предложены критериальные выражения, характеризующие изменение коэффициента теплоотдачи. Сравнение полученных с использованием программы «КОМДЕТ-М» расчётных данных с экспериментами подтверждает их хорошую сходимость.*

**Ключевые слова:** Компрессор. Детандер. Теплообмен. Тепловой поток. Локальный коэффициент теплоотдачи. Натурный эксперимент. Критериальная зависимость. Численный эксперимент.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Компрессорные и расширительные машины объёмного действия находят широкое применение в современных производственных системах. От их технического уровня зависит эффективность использования энергоресурсов, что предопределяет необходимость их постоянного совершенствования.

Эффективность машин объёмного действия (МОД) зависит от показателей одновременно протекающих и взаимосвязанных физических процессов. Среди них следует выделить процессы теплообмена рабочего вещества со стенками рабочей камеры и связанных с ней через органы газораспределения полостей как наиболее трудно поддающиеся изучению в машинах с замкнутым периодически повторяющимся рабочим циклом.

Начало работ автора в данном направлении совпало с появлением публикаций о закономерностях изменения коэффициентов теплоотдачи в двигателях внутреннего сгорания [1] и возрастающим интересом к методу математического моделирования рабочих процессов в компрессорных и расширительных машинах [2-4]. В это время наблюдается постепенный переход от простейших моделей, описывающих отдельные процессы рабочего цикла в идеально-газовой постановке, к более сложным моделям, учитываю-

щим совокупность протекающих процессов в их взаимосвязи с конструктивными особенностями объекта исследования.

Важным шагом на этом этапе явилось использование в моделях апробированных уравнений состояния реальных газов и газовых смесей [5].

Анализ рассмотренных в работе подходов показал, что этим требованиям в полной мере удовлетворяют уравнения состояния, основанные на принципе соответственных состояний, в частности, модифицированное Ли и Кеслером уравнение Бенедикта-Вебба-Рубина.

Дальнейшее развитие метода математического моделирования рабочих процессов в элементах МОД было обусловлено необходимостью учета существенных изменений свойств рабочего вещества в течение цикла, что характерно для поршневых детандеров, работающих в составе воздуходелительных установок и установок сжижения природного газа при отрицательных температурах газов на входе в детандер [6]. Прослеживалась тенденция получения комплексной выходной информации по результатам расчётного анализа в цифровой и графической форме не только по рабочей камере, но и по прилегающим к ней полостям и элементам газового тракта [7-9]. Актуальным становилось надёжное обоснование оптимальных вариантов исполнения машин на стадии проектирования и разви-

выбранный исследователем  $i$ -й рабочий процесс  $Q_{ср,i}$  количество подведенной (+) или отведенной (-) теплоты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Launder B.E., Spolding D.B.** Turbulence models and their application to the prediction of internal flows// Heat and Fluid Flow. — 1972. — No. 2. — P. 24-33.
2. **Annanel W.** Heat transfer in the cylinders of reciprocating internal combustion engines// Proc. Inst. Mech. Eng. — 1965. — V. 22. — No. 36. — P. 32.
3. **Gosman A.D., Melling A., Whitelaw T. H. et al.** Axisymmetric flow in a motored reciprocating engine// Proc. Inst. Mech. Eng. — 1978. — V. 192. — P. 213-223.
4. **Пластинин П.И., Твалчрелидзе А.К.** Введение в математическое моделирование поршневых компрессоров. — М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1976. — 80 с.
5. **Brablik J.** Analiticky model bezazneho srouboveho kompresoru// Strojrenstvi. — 1980. — 30. — No. 12. — P.756-760.
6. **Soedel W.** Design and Mechanics of Compressor Valves. — West Lafayette: Ray W. Herrick Laboratories of Purdue University, 1984. — 174 p.
7. **Lee B.I., Kessler M.G.** A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states// A.I.Ch.E Journal. — 1975. — V. 21 — P. 510-527.

8. **Рыжков А.А., Молодова Ю.И., Прилуцкий А.И. и др./** Особенности работы парожидкостного детандера в составе установок ожижения природного газа// Весник Международной академии холода. — 2012. — № 3. — С. 8-12.

9. **Прилуцкий А.И.** Комбинированный рабочий цикл прямоточной детандерной ступени// Весник Международной академии холода. — 2006. — № 3. — С. 31-35.

10. **Прилуцкий А.И.** Расчётная  $T,s$ -диаграмма реального цикла ступени поршневого детандера// Компрессорная техника и пневматика. — 2008. — № 1. — С. 22 -25.

11. **Колеснев Д.П., Молодов М.А., Прилуцкий А.А. и др.** Применение метода конечных объёмов при расчётном анализе рабочих процессов поршневого детандера// Весник Международной академии холода. — 2012. — № 1. — С. 53-59.

12. **Колеснев Д.П., Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К. и др.** Анализ газодинамических процессов в выхлопных окнах прямоточной ступени поршневого детандера// Компрессорная техника и пневматика. — 2013. — № 1. — С. 34-40.

13. **Борзенко Е.И., Молодова Ю.И., Прилуцкий А.И. и др.** Анализ характеристик ступеней поршневых компрессоров при работе на различных газах// Технические газы. — 2013. — №1. — С. 62-68.

14. **Прилуцкий А.И., Прилуцкий И.К.** Объёмная производительность поршневого компрессора  $V_{вс} = f(p_{вс}, T_{вс}, R) = const?$ // Компрессорная техника и пневматика. — 2013. — № 3. — С. 35-41.

**I.K. Prilutskiy, Doctor of Technical Sciences**

St.-Petersburg National Research University Information Technologies, Mechanics and Optics, Institute of Cold and Biotechnology Str. Lomonosov, 9, St.-Petersburg, Russia, 191002  
e-mail: 55920852@mail.ru

## THE METHOD OF DETERMINING LOCAL CURRENT COEFFICIENTS OF HEAT TRANSFER IN THE ELEMENTS OF THE SPATIAL OPERATION MACHINES STAGES

*The efficiency of the spatial operation machines (compressors and expanders) depends on the character of the processes that are carried out in them and especially the processes of heat exchange of gas with the walls of the working chamber and the valves. In developing an experiment-calculated method for determining the local coefficient of heat transfer from gas to the cylinder wall the assumptions about the quasi-stationary state of the heat exchange processes and an one-dimensional direction of the heat current have been made. The estimated model of the processes was developed as a result of combination of the analytical approach with the founded choice of the generalized criterial dependence. The use of the model has allowed to study the influence of the design (the cylinder diameter, a piston stroke) and the mode (the degree of pressure increase in a compressor stage, the frequency of the shaft rotation) indexes on the size of the local coefficient of heat transfer under the change of the shaft rotation angle. For the model simplification the criterial expressions that characterize the change of the heat transfer coefficient have been suggested. The comparison of calculated data obtained with the use of the program «KOMDET M» with the experimental data confirmed their close correspondence.*

**Keywords:** Compressor. Expander. Heat exchange. Heat current. Local coefficient of heat transfer. Natural experiment. Criterial dependence. Numerical experiment.

## REFERENCES

1. **Lauder B.E., Spolding D.B.** (1972). Turbulence models and their application to the prediction of internal flows// Heat and Fluid Flow. — No. 2. — P. 24-33.
2. **Annel W.** (1965). Heat transfer in the cylinders of reciprocating internal combustion engines// Proc. Inst. Mech. Eng. — V. 22. — No. 36. — P. 32.
3. **Gosman A.D., Melling A., Whitelaw T. H. et al.** (1978). Ax-symmetric flow in a motored reciprocating engine// Proc. Inst. Mech. Eng. — V. 192. — P. 213-223.
4. **Plastinin P.I., Tvalchrelidze A.K.** (1976). Introduction to the mathematical modeling of reciprocating compressors. — Moscow: Bauman Moscow State Technical University. — 80 p. (Rus.)
5. **Brablik J.** (1980). Analiticky model bemazneho srouboveho kompresoru// Strojiřensvi. — V. 30. — No. 12. — P. 756-760.
6. **Soedel W.** (1980). Design and Mechanics of Compressor Valves. — West Lafayette: Ray W. Herrick Laboratories of Purdue University, — 174 p.
7. **Lee B.I., Kessler M.G.** (1975). A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states// A.I.Ch.E Journal. — V. 21 — P. 510-527.
8. **Ryzhkov A.A., Molodova Yu.I., Prilutskiy A.I. et al.** (2012). Features work the vapors-liquid expander in the liquefaction of natural gas plant// Vesnik Mezhdunarodnoy akademii holoda. [Bulletin of the International Academy of Refrigeration] — № 3. — P. 8-12. (Rus.)
9. **Prilutskiy A.I.** (2006). Combined working uniflow expander stage// Vesnik Mezhdunarodnoy akademii holoda. [Bulletin of the International Academy of Refrigeration] — № 3. — P. 31-35. (Rus.)
10. **Prilutskiy A.I.** (2008). Calculated  $T_s$ -diagram of the real stage piston expander cycle// Kompresornaya tehnika i pnevmatika [Compressors and Pneumatics] — № 1. — P. 22-5. (Rus.)
11. **Kolesnev D.P., Molodov M.A., Prilutskiy A.A. et al.** (2012). Application of a finite volume method for the analysis of the calculated working processes reciprocating expander// Vesnik Mezhdunarodnoy akademii holoda. [Bulletin of the International Academy of Refrigeration] — № 1. — P. 53-59. (Rus.)
12. **Kolesnev D.P., Prilutskiy A.I., Prilutskiy I.K. et al.** (2013). Analysis of gas-dynamic processes in the exhaust windows direct flow stage reciprocating expander// Kompresornaya tehnika i pnevmatika [Compressors and Pneumatics] — № 1. — P. 34-40. (Rus.)
13. **Borzenko E.I., Molodova Yu.I., Prilutskiy A.I. et al.** (2013). Analysis of the stage characteristics of the piston compressor operating on various gases// Zhurnal Tehnicheskie Gazy. [Journal of Industrial Gases] — № 1. — P. 62-68. (Rus.)
14. **Prilutskiy A.I., Prilutskiy I.K.** (2013). Volumetric capacity reciprocating compressor  $V_s=f(p_s, T_s, R)=const?$ // Kompresornaya tehnika i pnevmatika [Compressors and Pneumatics] — № 3. — C. 35-41. (Rus.)

## ООО «ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ»

**ИНТЭТ занимается научно-техническим, информационным и кадровым обеспечением предприятий, относящихся к отраслям кислородного и криогенного, компрессорного, холодильного, углекислотного, нефтегазового, химического и энергетического машиностроения**

**ИНТЭТ выполняет следующие работы:**

- проведение НИР
- поддержка реализации профильных проектов, консультации
- разработка технологической части рабочих проектов
- организация повышения квалификации, обучения с целью получения высшего образования и переподготовки кадров по специальности «Криогенная техника и технология» на базе Института холода, энерготехнологий и эконенергетики им. В.С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий

а/я 266, г. Одесса, 65023,  
 тел. +38(048) 234-41-62, 234-41-57  
 факс: +38(048) 777-00-87  
 e-mail: lavrenchenko@paco.net  
 www.uasigma.odessa.ua

